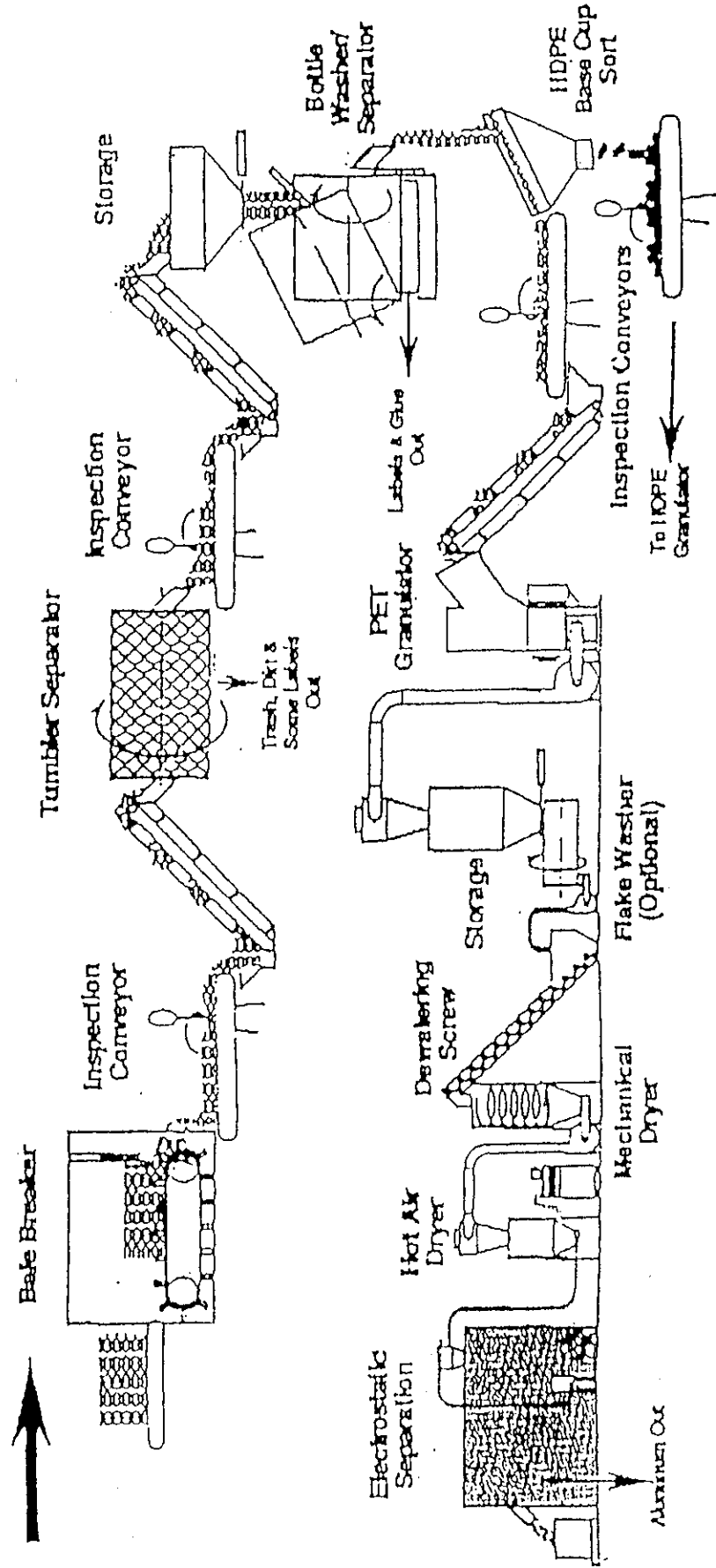


Fig. 4 PET Beverage Bottle Washing & Separation System



% の含有樹脂をバージンに対し 5 ¢/lbsのプレミアムをつけて Coca Cola に提供する契約を結んだが、再生コストがアップして採算が合わず、又、十分な量が集まらないことによる稼働率の低下が、更にコストを圧迫し、2年間稼働しただけで、1993年以降、既存の設備を使用してのボトルの再生は中止している。同社は現在、もっと効率の良い解重合技術を開発中と発表しているが、その詳細については明らかにされていない。

DuPont社：

1992年、8,000 t/y のメタノリシスのパイロットプラントをスタート。同年 FDA の no objection letter を取得した。1995年に 12 MM\$ をかけて 45,000 t/y のメタノリシスのプラントを建設し、フィルム、カーペット繊維など素性のはっきりした廃棄物について再生を行なって、成形品用の樹脂に再利用⁷⁾している。PETボトルの回収はやっていない。

この他に United Resource Recovery Corporation (URRC)が 1995 年に「UnPET Process」と称する不純物が 40 % まで許容される PET 廃棄物を粉碎して、ロータリーキルンの中で苛性ソーダなどのアルカリ金属と混合加熱し、水和、中和を行なって PET の素原料であるテレフタル酸とエチレングリコールを回収する技術の特許のライセンスを発表している。^{8) 9)} X線フィルムからの PET 回収でパイロットプラントでの実績があり、メタノリシス法に比べて 1/3 の設備費で済むと云っている。PETボトルについては実績はない。

PETボトルのケミカルリサイクルについても経済性に焦点を合わせて、過去の技術となっていたアルカリ分解を見直す動きが出始めている。

このように米国においては現在では「Bottle-to-Bottle」を指向しながらも、経済的に有利なマテリアルリサイクル方式による回収PETボトルの再生が主流になって行なわれ、これに食品直接接触安全性を付与する技術を組合せた「メカニカル リサイクル」の実用化を目指しているというのが実態のようである。

1-2) ヨーロッパその他

ヨーロッパにおける PETボトルのリサイクルはマテリアルリサイクル方式を主体として、米国より遅れ、1980年代の半ばから PETボトルの普及に合わせて本格的に取り組まれるようになった。ヨーロッパで、回収された PETボトルの再生を最初に行なったのは、オランダの REKO社である。再生設備はイタリアの SOREMA 社のものでスタートし、その後自社で改良を加えて現在に至っている。当時はそのほかの国では PETボトルを再生する工場が無かったために英国、フランス、イタリア、等から回収した PETボトルの再生を一手に引き受けていたが、その後イタリア、スイス等に PETの再生処理工場が建設されて現在では 5カ国で再生が行なわれている。同社のプロセスはその後 1994 年にオランダの Technical Nature Scientific Research Institute (TNO)から食品用のボトルにそのまま使用できるほどクリーンであるとの

証明を得ている。ヨーロッパで回収されるPETボトルは米国と同じように炭酸飲料用のボトルが主体であったが、最近ではPVCボトルからの移行でミネラルウォーターのボトルが急増している。ボトルの構成も米国と同様なものになっているので、米国の再生プロセスがそのまま適用できる。SOREMA社のプロセスを採用しているところが多く、米国のJohnson Controls社の当初の設備もSOREMA社のものと云われており、工程は第2表に示すようなものと思われる。1995年に米国のWellman社がオランダに進出し、PETボトルの再生工場を建設したが、更に1997年には同じくオランダの他の場所に食品直接接触使用可能なメカニカルリサイクル方式(EcoClear)の工場を建設している。Schmalbach-Lubeca (Johnson Controlsを買収)社も1997年にフランスに食品に直接接触使用できるメカニカルリサイクル(Supercycle)の工場を建設した。

第3表にヨーロッパにおいて実際に稼働しているPETボトルの再生工場を1997年11月のPETボトル協議会が実施した調査時に入手した¹¹⁾PETCORE (PET CONTAINER RECYCLING EUROPE)の資料から引用して示した。(第3表 参照) 西欧におけるPETボトルの再生は第3表から分かるようにマテリアルリサイクルが殆どであり、1997年の時点で再生工場も全欧州に拡大し、その能力の合計は10万ト/年を超えている。更に、最近の傾向として、Schmalbach-Lubeca社、Wellman社など米国では普及しなかった食品直接接触、即ち「Bottle-to-Bottle」が可能なクリーン化処理を加えたメカニカルリサイクルが増加する傾向が出てきている。これはリサイクルシステムのクローズド化の要請への対応と共に、欧州全域に広がりつつあるGREEN DOTによるリサイクルシステムの経済面での支援が大きな要因になっていると考えられる。この傾向を受けて、従来からコストが掛かりすぎるという理由で敬遠されていたケミカルリサイクル即ち解重合によるPETボトルの再生を改めて見直そうとする動きも出始めている。米国のURRC社⁸⁾、フランスのTREDI社¹⁸⁾、オーストラリアのInPET社¹⁹⁾などから新しい提案がなされている。現時点では未だ商業化する段階には至っていないが、従来方式に比べて低コストで精製が出来る可能性があるというところで熱心な研究開発が行なわれている。第4表にその一例を示す。(第4表 参照)

ヨーロッパ以外の日本を除く地域におけるPETボトル再生処理の状況については台湾とオーストラリアが知られている。第5表にその概要を示した。(第5表 参照)

台湾のTRC社は米国のPure Tech International社が本格的に製造したPETボトルの再生処理システムの第1号機を導入した。バッチ式によるボトル洗浄に特徴があり、これを行えばボトル内部までクリーンになり、粉碎後の洗浄は不要であるとしている。選別は人手による目視検査を主体とし、人件費の安い地域で効果を発揮する方式である。

オーストラリアのACI社のPETボトルの再生システムについての詳細はよく分からないが、自社で再生したPET樹脂をバージン樹脂とのサンドイッチ方式で自社の飲料ボトルに再利用している。

オーストラリアのSmorgon社(現在はSouth Corp社になっている)はマテリアルリサイクル方式として、液体窒素でボトル粉碎片を冷却し、更に微粉碎することによってPVCを微粉末状態にして篩分ける独自の方式で再生し、洗剤などのボトルに採用している。

1-3) 日本

日本における使用済みPETボトルの再生処理技術の開発は、1992年(平成4年)から始まった。PETボトル協議会が、増加するPETボトル廃棄物のリサイクルを推進するための

第3表 ヨーロッパにおけるPETボトル再生工場

国名	会社名	能力(t/y) ¹¹⁾	PROCESSの特徴
オランダ	REKO	12,000	回収PETボトル — 解梱 — ヲハル除去 — 手選別 — 金検 — 粉碎 — 洗浄 — 比重分離 — 水洗 — 乾燥 — PETボトル ¹²⁾ オランダで 食品接触 OK ('80~)
オランダ	WELLMAN	20,000	回収PETボトル — 解梱 — 手選別 — ヲハル除去 — 洗浄 — 粉碎 — 比重分離 — 水洗 — 乾燥 — PETボトル ¹³⁾ ('90~)
オランダ	WELLMAN	15,000	回収PETボトル — 解梱 — 手選別 — 粉碎 — 風選 — 洗浄 — 比重分離 — 脱水 — 乾燥 — 静電分離 — PETボトル ¹⁴⁾ ⇒ EcoClear 処理 ('97~)
イタリア	REPLASTIC (TECOPLAST)	2,000	回収PETボトル — 解梱 — 金検 — X線選別 — 洗浄 — 手選別 — 粉碎 — 風選 — ヲハル除去 — 洗浄 — 比重分離 — 脱水 — エアサイクン — 乾燥 — PETボトル ¹⁵⁾ ('90~)
イタリア	REPLASTIC (I. P. I. C.)	12,000	回収PETボトル — 解梱 — 洗浄 — 手選別 — X線選別 — 粉碎 — 洗浄 — 比重分離 — 篩分 — カラ選別 — PETボトル ¹¹⁾ ('96~)
スイス	POLY-RECYCLING	16,000	回収PETボトル — 解梱 — 洗浄 — ヲハル除去 — 手選別 — 磁選 — 粉碎 — 洗浄 — 比重分離 — 水洗 — 脱水 — 乾燥 — PETボトル ¹⁶⁾
英国	REPRISE	4,500	(不詳)
オランダ	TEXPLAST	8,000	回収PETボトル — 解梱 — 粉碎 — ヲハル除去 — 水洗 — 比重分離 — 脱水 — 乾燥 — PETボトル ('89~)
フランス	SCHMALBACH-LUBECA	5,000	(第2表のPROCESS参照) ⇒ Supercycle オランダ、英国、ベルギー、フランスで 食品接触 OK ('97~)
フランス	WELLMAN FRANCE RECYCLAGE	12,000	回収PETボトル — 解梱 — X線選別 — カラ選別 — 粉碎 — 風選 — 洗浄 — 比重分離 — 脱水 — 乾燥 — 静電分離 — PETボトル ¹⁷⁾ ('96~)
合計		106,500	

第4表 最近のケミカルリサイクルの動向

<p>国名</p> <p>プロセス名称</p> <p>社名・現状</p>	<p>PROCESSの特徴</p>
<p>フランス</p> <p>Reco-PET</p> <p>TREDI 社¹⁸⁾ (RECO PET社)</p> <p>'96 ~ 現在</p> <p>150 kg/h の パイロットプラントで開発中</p>	<p>回収PETボトル — 解梱 — 金検 — 粉碎 — 風選 — PETフレーク</p> <p>↑</p> <p>エチレングリコール → 回収 (重合への再使用は NO)</p> <p>PETフレーク — 無水苛性ソーダ添加(150~180 °C, 常圧) — 水添加</p> <p>— 濾過 — 活性炭吸着濾過 — 硫酸添加 — 水洗 — 乾燥 —</p> <p>↓</p> <p>PVC, PE, PP 顔料、その他 不純物</p> <p>↓</p> <p>晶析 — 高純度テレフタル酸</p>
<p>アメリカ</p> <p>UnPET</p> <p>URRC 社⁸⁾</p> <p>現在</p> <p>パイロットスケール</p>	<p>PETフレーク (40 %までの不純物をふくむ PETのフレークであれば OK、フィルム、カーペットからの実績はあるが、ボトルからの実績なし)</p> <p>PETフレーク — 苛性ソーダ濃厚溶液添加 (界面活性剤ふくむ、常温、常圧)</p> <p>↑</p> <p>エチレングリコール → 回収</p> <p>— 回転キル加熱 (250 ~ 300°C, かつ気流下) — 水添加</p> <p>— 脱水 — 濾過 — 酸中和 — 脱水 — 水洗 —</p> <p>精製 (常圧、105 °C) — 乾燥 — 高純度テレフタル酸</p>
<p>オーストラリア</p> <p>Renew Process</p> <p>InPET社¹⁹⁾</p> <p>現在</p> <p>500 kg/h パイロットプラント</p>	<p>回収PETボトル — 粉碎 — 風選 — 水洗 — 比重分離 — 乾燥 —</p> <p>EG洗浄 — EG加熱 (常圧) — 微粉碎 — 篩分 — 水篩 —</p> <p>微粉碎 — 加水分解(200°C) — 水洗 — 濾水 — 高純度</p> <p>↓</p> <p>エチレングリコール ⇒ 回収、精製</p> <p>食品直接接触に FDA OK</p>

第5表 欧米以外の地域におけるPETボトルの再生処理技術

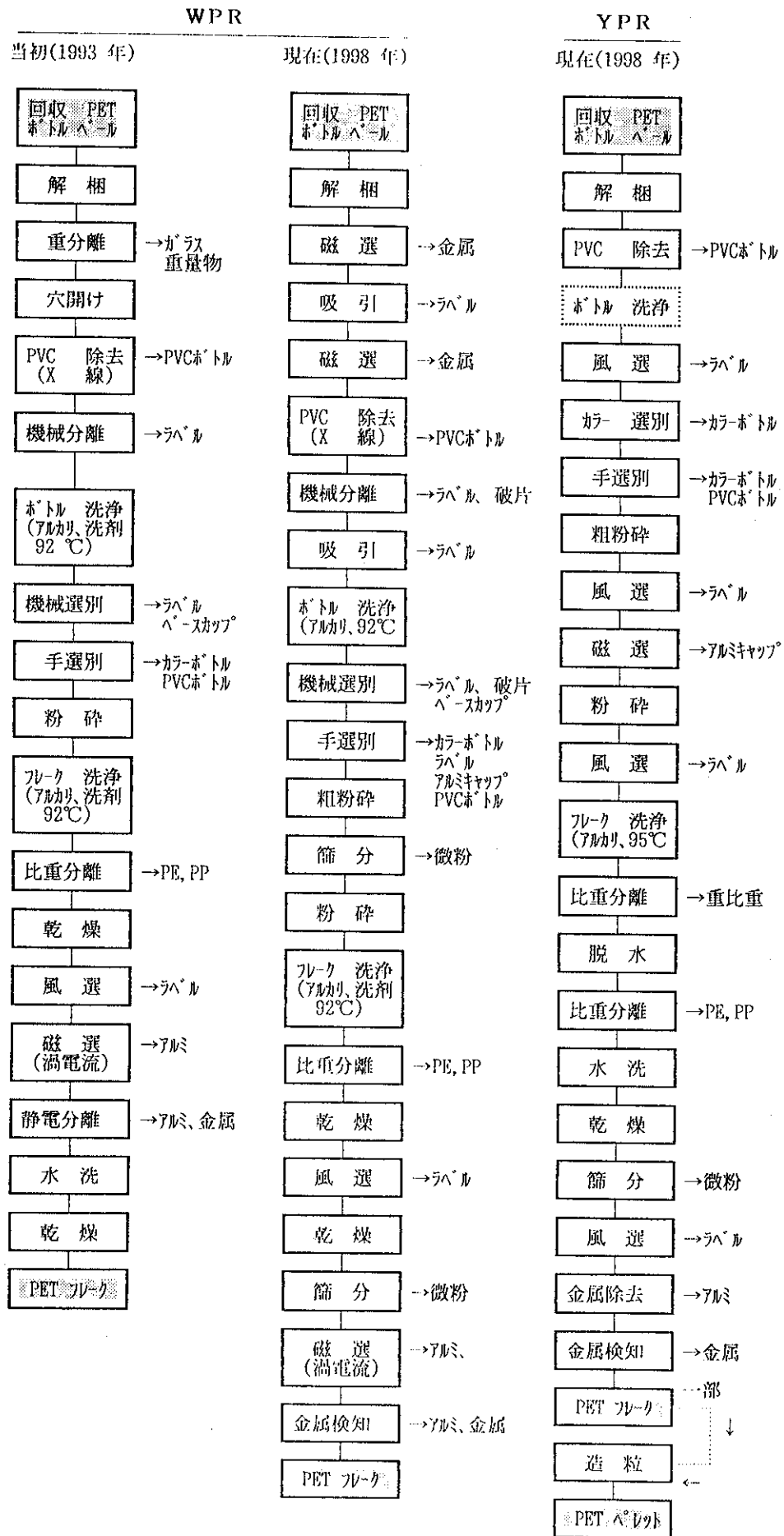
国名	会社名	PROCESSの特徴
台湾	TRC ²⁰⁾	Pure-Tech のプロセスを導入 (1号機) 回収PETボトル — 解梱 — 機械選別 — 手選別 — ボトル洗浄 — バル除去 — 手選別 — 粉碎 — PETカク
豪州	ACI	詳細不詳
豪州	South-corp (Smorgon) ²⁰⁾	回収PETボトル — 粉碎 — 冷凍 (液体チリ) — 粉碎 — 篩分 — 洗浄 (常温) — 比重分離 — 水洗 — 脱水 — 乾燥 — 風選 — 造粒 — PETカク NITROCLEAN PROCESS
韓国	三養社 ²¹⁾	Pure-Tech の新しいプロセスを導入 ⇒ Fig. 4 参照

本格的な再生工場の建設を計画し、先行していた欧米の技術調査と、日本国内で回収されるPETボトルの品質を勘案して、欧米の装置メーカーの中からイタリアのGOVONI社のTECOPLAST方式を選定し、1993年に実証試験工場(処理能力8,000t/y)を栃木県に建設した。これが現在のウイズペットボトルリサイクル(株)(WPR)である。操業開始当初、事前に予期しなかった問題が発生したが、工程の手直しや追加、省略が行なわれ、現在は安定した操業を続けられる体制になっている。Fig.5にWPRの当初の工程と現在の工程を比較して示した。更にPETボトル協議会はWPRの経験を基に1997年に三重県に関西地区の8,000t/yの処理能力を持った本格的なりサイクル工場(ウイズペットボトルリサイクル(株)(YPR)を日本の技術で建設した。Fig.5にYPRの工程も合わせて比較した。

Fig. 5 日本における代表的なPETボトル再生処理工程

WPRにおいては、PVCボトルの除去、ラベル、アルミキャップの破片の除去が不十分、リンスの不足、乾燥能力不足などの品質上の問題の他に、粉碎機の刃の寿命や設備、計器の故障など操業上の問題が顕在化し、工程の変更や補強が行なわれた。YPRはWPRの設備上の問題点を解決し、WPRに較べて効率的に再生処理できる新しいシステムになっているが、この工程でも、得られたPET樹脂の品質面で、まだ改善の余地のあることが最近になって解ってきており、再利用側の要求との調整を図りながら改良を進めている状況である。その後1998年に北九州市に新日鉄を核とする本格的なPETボトルの再生処理会社西日本ペットボトル

Fig. 5 日本における代表的なPETボトル再生処理工程



リサイクル（NPR）がYPRのシステムをベースにして誕生し、1999年には札幌市郊外に 6,000 t/yの北海道ペットボトルリサイクル（HPR）が完成した。

更にこれらの伝統的な再生処理方式に加えてマテリアルリサイクルの一つの方式として乾式洗浄方式というのが提案されて注目を浴びている。アインエンジニアリング（株）（東京都品川区五反田 1-32-2）が開発した「クリーニング・セパレーター」と呼ばれる装置を使用するもので、この方式はPVCなどの異種樹脂を予め除去した後、PETボトルを粉砕し、これを高速で回転するドラムの中で空気と衝撃摩擦を加えることによって樹脂表面に付着した汚れや異物を掻き取る考え方に基づいている。水による洗浄工程を使用しないために廃水処理が省略できるという特徴がある。現在この方式で再生されたPET樹脂がPETシートに加工され卵パックに使用されている。

現在のマテリアルリサイクル工程で得られた再生PET樹脂はその方式から精製に限界があり、そのまま食品に直接接触として使用するには衛生的に安全とは云えない。そこで海外と同じように日本でも最近になってPET樹脂を組成原料に分解して精製する所謂ケミカルリサイクルの試みが提案されてきた。これらを第6表に示す。（第6表 参照）

これらは原理的には古くから知られており、マテリアルリサイクルに比べて品質の良い再生品を提供できる方式であるが、技術及び経済性で商業生産への適用に問題があり実用化されてこなかったものである。この中で最近特に注目を集めているのがアイエス式モノマー回帰法と三菱重工の超臨界メタノール法である。いずれも世界では未だ工業化の実績はなく、日本でも開発段階の技術である。

アイエス社の方式はPET樹脂をエチレングリコール(EG)で解重合する所謂グリコリシスでモノマーに分解し、モノマーの段階で蒸留精製する方式である。従来、濾過、再結晶による精製しか行なわれていなかったグリコリシスに蒸留精製という方式を工業的に適用するという画期的な技術であり、国の助成を得て開発中の技術である。又、超臨界メタノール法については従来のメタノリシスをより高温、高圧下に進めることによって反応の効率を向上させ、結果として低コストでのリサイクルを実現しようとする狙いがある。いずれにしても現在の技術水準から見て先ずパイロットプラント段階からの検討が必要になるものと思われる。

1-4) Bottle-to-Bottle を指向した再生処理技術開発の現状

1998年から 1999 年にかけて、再生処理したPET樹脂をそのまま食品に直接に接触使用しても安全衛生的に問題の無い程度までクリーンにする技術、所謂 Bottle-to-Bottle 技術に対する関心が高まり、使用済みワンウェイボトルのクローズド化を確立することによって社会との調和を図ろうとする動きが世界的に活発になってきた。米国に始まり、現在欧州で具体的な開発が進められているが、日本においても1989年から関係業界の中で、具体的な調査研究が始まっている。

1-1)でも述べたが世界で唯一商業生産規模の実績のある米国でも現在は生産を中止しており、その他の地域では未だ開発中の段階であるが、この所にきて回収PETボトルを機械的に処理してクリーン化するメカニカルリサイクルに関して幾つかの処理会社（Processor）、装置メーカーから種々の提案や発表がなされており、又従来から知られ、現在は停滞している化学的に分解して精製するケミカルリサイクルについても活発な動きが出てきている。最近のメカニカルリサイクルに関する開発状況を第7表に纏めた。（第7表）

これによると多くのプロセスや設備の提案が出されており、殆どの方式が米国食品医薬品局

第6表 日本におけるPETボトルのケミカルリサイクルの試み

方式	研究・開発	PROCESSの特徴
超臨界メタノール法	工業技術院 物質工学 工技研 (佐藤、佐古) ²²⁾	PETボトル — 粉碎 — メタノール添加(10倍量) — 加熱(300°C, 100気圧, 30分) — 冷却(水添加) — 濾過 — 蒸留 — DMT ↓ EG 反応が速い、無触媒、→ 低コスト
	MHI PETモノマー化 プロジェクト (三菱重工) ²³⁾	PETボトル — 超臨界メタノールによる分解精製 — DMT — 加水分解 (三菱プロジェクト) (Hulsプロジェクト) ↓ EG — PTA
超臨界水法	神戸製鋼所 ²⁴⁾	PETボトル — 粉碎 — 水添加 — 加熱(374°C, 220気圧, 10分) — 冷却 — 濾過 — PTA 反応が速い、EG収率低い
酸分解法	東北大学 ²⁵⁾ 工学部 (奥脇、吉岡)	PETボトル — 微粉碎(0.1~0.3 m/m) — 硫酸添加 — 加熱(150°C, 5 hrs) — 冷却 — 濾過 — 水洗 — 乾燥 — PTA ↓ EG回収 安価な硫酸で分解 → 低コスト
アルカリ分解法	京都工繊大 ²⁶⁾ 環境科学センター (奥、山田、胡)	PETボトル — 粉碎 — EG, アルカリ添加 — 加熱(180°C, 20分) — 濾過 — 中和(酸添加) — 濾過 — 水洗 — 乾燥 ↓ EG回収 ↓ 芒硝 — PTA 常圧反応、芒硝製造 → 低コスト
ガリックス	アイエス式モノマー回帰 法 ²⁷⁾ (アイエス)	PETボトル — 粉碎 — 洗浄 — 風選 — 比重分離 — 細粉碎 — 洗浄 — 脱水 — 解重合 — 粗BHET — 濾過 — 精製 ↑ EG ↓ 異種プラスチック — 結晶化 — 遠心分離 — 蒸留 — BHET — 熔融重合 ↓ EG — 固相重合 — 糸用PET樹脂

EG : エチレングリコール
PTA : 高純度テレフタル酸
DMT : テレフタル酸ジメチル
BHET : ビスヒドロキシエチルテレフタレート

第7表 瓶加工技術 方式による Bot-to-Bot 再生処理技術の開発状況

会社名	PROCESSの特徴
1. Schmalbach-Lubeca (ドイツ) 14,000 t/y	回収PETボトル — 解梱 — 手選別 — 磁選 — ボトル洗浄(95℃) — — ハル分離機 — 手選別 — 磁選 — 粉碎 — 洗浄 — 比重分離 — — ハトナイフ分離 — 洗浄 — 比重分離 — 脱水 — 乾燥 — PETフレーク ¹⁸⁾ (Supercycle) PETフレーク — 熔融 — 濾過 — 造粒 — 結晶化 — 化学薬品による強制洗浄 — 260℃加圧処理 — 減圧触媒処理 — 熔融濾過 — 造粒 — PETフレーク '97 ~ アメリカ生産実績あり FDA ○
2. Wellman Inc. (アメリカ) 90,000 t/y	回収PETボトル — 解梱 — 手選別 — 粉碎 — 風選 — 洗浄 — 比重分離 — 脱水 — 乾燥 — 静電分離 — PETフレーク (EcoClear) PETフレーク — 加熱熔融 — 押出 — 濾過 — 冷却 — 切断 — PETフレーク PETフレーク '97 ~ 欧州で開発中? FDA ○
3. PTI/Phoenix Tec. (アメリカ)	回収PETボトル (デボジット) — 解梱 — 選別 — 粉碎 — 洗浄 — 瓶加工クリーニング処理 — PETフレーク C.C.より開発受託、'99 ~ オーストラリアで企業化 ³¹⁾ FDA ○
4. Pure-Tech International Inc. (アメリカ) 38,000 t/y	回収PETボトル — 解梱 — 手選別 — 機械選別 — 手選別 — ボトル洗浄 — 機械選別 — 手選別 — 粉碎 — フル洗浄 — 脱水 — 乾燥 — 静電分離 — PETフレーク — 瓶加工クリーニング処理 — PETフレーク '98 ~ 生産実績? FDA ○
5. Nationwide Recyclers (アメリカ) 10,000 t/y	回収PETボトル — 解梱 — PVC自動選別 — PVC手選別 — 粉碎 — 洗浄 — 比重分離 — 浮遊分離 — 脱水 — 乾燥 — PETフレーク PETフレーク — 瓶加工クリーニング処理 — PETフレーク '98 ~ 生産実績? FDA ○
6. REKO (オランダ) 12,000 t/y	回収PETボトル — 解梱 — ハル除去 — 手選別 — 金検 — 粉碎 — 洗浄 — 比重分離 — 水洗 — 乾燥 — PETフレーク '94 ~ 生産実績? FDA — TNO ○
7. Buhler (スイス)	PETフレーク — 熔融 — 減圧処理 — 濾過 — 造粒 — 固相重合 — PETフレーク '99 ~ 瓶加工技術設備販売 FDA — TNO ○
8. KREMA (オーストリア)	PETフレーク — 減圧圧縮 — 熔融 — 減圧処理 — 濾過 — 押出 — PETフレーク '99 ~ 瓶加工技術設備販売 FDA — TNO ○
9. OHL (ドイツ)	(Stehning Process) PETフレーク — 熔融 — 減圧処理 — 濾過 — 造粒 — 固相重合 — PETフレーク '99 ~ 瓶加工技術設備販売 FDA ○ TNO ○

(FDA) の no objection letter かオランダの Technical Nature Scientific Research Institute(TNO) の証明を取得し、食品用途に直接接触して使用しても安全であるとしている。このように多くのメカニカルリサイクルが提案されるのは、この方式がケミカルリサイクル方式に比べて投資額が少なく、コストが安く、事業としてのリスクが少ないことによるものと考えられる。しかし実際に商業規模で生産するのはこれからで、この方式が広く普及するかどうかはもう少し時間が経たないと断定はできない。この理由として考えられるのは、回収ボトルに含まれる可能性のある人体に有害な物質がメカニカルクリーニングの過程で無害な程度にまで除去されることでもって安全であるという判断をしていることに対して、安全であっても、着色や少量の微細な異物の残留が消費者として許容できるものかどうかを見極める必要があるからである。この点ではPET樹脂を解重合して素材の段階で精製するケミカルリサイクル方式による再生PET樹脂の方が消費者に受け入れやすいと云えよう。

一方、ケミカルリサイクルについては最近、米国の Eastman Chemical 社が Bot-to-Bot のを完成するため、従来のメタノリシス方式を改良した方式である「Solvolytic」を開発し、米国でパイロットプラント建設に入ったと発表した。^{10) 26) ~ 28)} 約2年間でデータを採り、その後ヨーロッパで 50,000 t/y のプラントを建設し、EUの 15 % リサイクル 目標に対応する解決法に寄与したいとしている。

日本においてはPETボトル協議会が関係企業と連絡を取りながら、アイエス法や超臨界メタノリシス法について調査の段階に入っている。

2. PETボトルの再生処理技術

PETボトルの再生処理技術の究極の目標は前章で述べた如く、使用済みのPETボトルの回収時にボトルに付随して回収されるPET樹脂以外の物質を再生処理工程で完全に除去し、PET樹脂だけを如何に純粋に回収するかにある。回収時に付随してくるものには大きく分けて消費者の手に渡る前に既に製品本来に付随していたものと、使用後から回収されるまでの間に付随又は混入して回収されるものがある。

この章では製品に由来して回収されるPET樹脂以外の物質と使用後から回収迄の間に付随又は混入してくる物質に分けて分離除去技術を考察し、これらの組合せで行なわれている再生処理技術の成果と問題点を日本の再生プラントの現状に当てはめて考えてみたい。

2-1) 製品に由来するPET以外の物質

現在、日本において法律でリサイクルの対象となっているPETボトルは第二種指定製品とされた清涼飲料用、酒類用、醤油用に使われたものである。これらの製品の中身の充填前のボトルの構成は第8表のようになっている。(第8表 参照)

ボトル本体であるPET樹脂以外にポリプロピレン(PP)やポリエチレン(PE)を主体としたキャップやキャップライナー類の他に、ラベル類として清涼飲料にはポリスチレンのシュリンクラベル(OPS)、醤油には紙ラベルが多く使用されていることがわかる。当初から使用されていた塩ビのシュリンクラベルは最近急速に使用量が減少してきており、大手のメーカーの製品には殆ど使用されていない。酒類の大型ボトルには再生工程で脱落するインキを使用して直接印刷されているものもあり、紙ラベルにはエチレン/酢酸ビニル系のホットメルト接着剤が使用されている。それぞれの使用量は第8表の左端に示した通りであり、把手付きを除いても

第8表 第二種指定製品用PETボトルの構成

	ボトル本体		キャップ		キャップライナー		ラベル *2		把手		異物の 総量 ppm *1
	容量	重量 gr	材質	重量 gr	材質	重量 gr	材質	重量 gr	材質	重量 gr	
清涼飲料											
耐熱ボトル	2.0	69	PP	2.7	LDPE	0.3	OPS	2.5	—	—	79,710
”	1.5	59	PP	2.7	LDPE	0.3	OPS	2.1	—	—	86,441
”	0.5	32	PP	2.7	LDPE	0.3	OPS	1.1	—	—	128,125
炭酸ボトル	1.5	49	PP	2.7	LDPE	0.3	紙	1.0	—	—	81,633
”	0.5	32	PP	2.7	LDPE	0.3	OPP	3.0	—	—	187,500
アセブボトル	2.0	57	PP	2.9	—	—	OPS	2.5	—	—	94,737
”	0.5	25	PP	2.9	—	—	OPS	1.1	—	—	160,000
酒類											
焼酎ボトル	4.0	140	7ルミ	1.9	LDPE	1.1	*3 印刷	0.6	PP	19	161,429
”	2.7	100	7ルミ	1.9	PET /PE	1.0	紙 OPP	1.0	PP	17	209,000
醤油											
醤油ボトル	1.8	65	PE	6.2	—	—	紙	3.4	PP	17	409,200
”	1.0	33	PE	6.2	—	—	紙	1.4	—	—	230,300
”	0.5	24	PE	6.2	—	—	紙	0.8	—	—	291,667
<p>*1; ボトル中の PET 樹脂にたいする 比率</p> <p>*2; ラベルに 使用する接着剤としての重量は 不明であるが 材質としては エチレン-酢ビ 系のものが 多い。又、ごく 一部で 清涼飲料のボトルに PE 製のハースカップが 使用されているものがあるが 量が 少ないので 省いた</p> <p>*3; 印刷の場合にはインキの 重量</p>											

10～20%の異物質が使用されていることが分かる。又、ボトルの容量が小さくなるほど異物の比率は高い。

これらのPET以外の物質が再生PET樹脂に残留した場合の再利用時の問題点については、次のように云われている。

まずPE, PP, OPSなどのプラスチックはPET樹脂の再利用時の熱溶融の際に同時に溶融して混合し、フィルター詰まりや糸切れなど再生PET製品の製造時に障害を齎したり、着色や強度低下など再生製品の品質を悪くする原因となる。紙ラベルについても再生処理の過程で細かい繊維状に分解し、PETの再利用時の熱で劣化し、再利用製品製造工程でのフィルター詰まりや、糸切れの原因になっている。アルミ片の残留は熱溶融時のフィルター詰まりの原因となり、交換頻度が多くなると稼働率や歩留の低下に繋がる。その他ラベル類に使用される接着剤はPETの再利用時の熱で分解し、微量でもPETを着色させるものがあることが解っている。

平成9年を例にとり第二種指定製品全体について使用された異物質の総量を或る仮定を置いて平成9年度の需要実績から試算した結果を第9表に示した。(第9表 参照)

この推定によると、PET重量に対し約11%が製品に由来するPET以外のボトルの付属品として市場に出回り、その内訳はPPやPE, PSなどのポリオレフィン類などが10%程度を占めて最も多く、次いで紙類が0.6%を占め、アルミは0.08%となっていることがわかる。家庭からの回収に際しては、キャップを取り外すようにPRしているので実際はこれよりは少なくなってきたものの、再生処理工場で受入れている回収PETボトルをみると全体の20～30%がキャップのついた状態になっており、0.02～0.03%は混入しているものと推察される。

ここで製品に由来するもう一つの問題としてPETボトル本体の着色がある。PETの再利用を考える場合、再生樹脂が着色しているとその再利用の用途が制約される。そのために異物ではないが、再生PET樹脂を作る際には無色と着色に分けて処理することは必須の条件となる。現在、清涼飲料の一部には、その内容物の保護を目的とした着色や商品価値を高めるための着色を施したものが製造されている。回収されたPETボトルの中にシーズンによって異なるが10～20%の着色ボトルが混入している実態が報告されている。着色ボトルについてはその後業界で定めたガイドラインにより、極力避けるように申し合わせ10%以下に減少しているものと推定される。

2-2)製品に由来しないPET以外の物質

製品に由来しないものとしては内容物の残滓、塵埃、土砂、第二種指定以外のPETボトル、PET以外のプラスチックボトルなどがある。この中でPETの再利用を進めるに当たって最も注意しなければならないものは、PET以外のプラスチックボトル、就中、塩ビボトル(PVCボトル)である。PVCボトルは現在、リサイクルの対象となっている第二種指定製品では、醤油、調味料、ミネラルウォーターなどに一部使用されており、外観がPETボトルと見分けが付きにくい為に、消費者が間違っ てPETボトルとして分別排出する場合が多い。業界の方針で第二種指定製品へのPVCボトルの使用は、当初に較べてかなり減少してきているものの、再生処理工場で受け入れた回収PETボトルの中には現在でも0.2～0.3%のPVCボトルが混入しているのが実態である。

回収時に付随して混入してくる残滓、塵埃、土砂などは再生処理工程で比較的除去し易いも

第9表 第二種指定製品の生産比率の推定

用途	樹脂量 (10 ³ ト)	容量別内訳		生産重量 比率 (%)	ポリプロピレン ppm	アクリル ppm	紙 ppm	OPS ラベル ppm	その他 ppm
		(ℓ)	(10 ³ ト)						
清涼飲料	194.7 *1								
耐熱	136.3 *3	0.5	40	16.76	15,711			5,762	
		1.5	44.3	18.56	9,436			6,607	
		2.0	52	21.78	9,469			7,892	
炭酸	58.4 *3	0.5	10	4.19	3,927			3,929	
その他		1.5	48.4	20.28	12,416		4,139		
清涼飲料 (アウトサイダー)	20.0 *2								
アセブ	20	0.5	10	4.19	4,860			1,844	
その他		2.0	10	4.19	2,132			1,838	
		(清涼飲料 小計)		89.95)	57,951			27,872	
酒類	10.8	2.7	8	3.35	6,030	637	335		
		4.0	2.8	1.17	1,680	159			51
醤油	13.2	0.5	1.4	0.59	1,524		197		
		1.0	10.5	4.40	8,267		1,333		
		1.8	1.3	0.54	1,927				
合計	238.7		238.7	100	77,379	796	6,004	27,872	51
					(合計 112,102 ppm)				
*1 1997年 PETボトル協議会調査 第二種指定製品用PET 樹脂需要実績									
*2 1997年 アウトサイダー- 使用樹脂量 は 推定値。									
*3 耐熱：炭酸その他 = 7 : 3 とした。									
*4 容量別本数比を 次のように想定した。(単位；億本)									
耐熱 (0.5 : 1.5 : 2.0 = 13.3 : 7.5 : 7.5)									
炭酸 その他 (0.5 : 1.5 = 3.1 : 9.9)									
アウトサイダー- (0.5 : 2.0 = 4.0 : 1.8)									
酒類 (2.7 : 4.0 = 0.8 : 0.2)									
醤油 (0.5 : 1.0 : 1.8 = 0.6 : 3.2 : 0.2)									

のであるが、PVCボトルは塩化ビニル樹脂の性質がPET樹脂の性質によく似ている為に、粉碎された状態で混合してしまうと現在の工業技術では簡単に分離できない。PVC樹脂の混入しているPET樹脂をそのまま再利用するとPETの熱溶融時にPVCが分解し、全体を着色させたり、糸切れを生じたり、又、分解時に生成する塩酸により設備を腐食させるなどのトラブルを生じる。

2-3) PET以外の物質の分離除去技術

前述の使用済みPETボトルの回収時に付随して混入するPET以外の物質のマテリアルリサイクルにおけるPET再生処理工程で採用されている分離除去技術をまとめて第10表に示した。(第10表 参照)

PVCボトルの識別除去に関しては、多くの方式が行なわれてきたが最も原始的で簡単な方法はPVCボトルがアルカリを含む水溶液中で加熱されると僅かに白濁する性質を捉えて目視摘出するやり方である。しかし人手を要することと精度に問題があり、現在ではPETとPVCのX線の吸収率の差を検出し、エアジェットで排出する方式が経済的で精度も良いという理由で広く採用されている。最近開発された近赤外線による識別は、多種類のプラスチックボトルが混在している場合の識別には有効であるが、PETとPVCの2種を識別するのであれば、処理速度や設備費を考慮すると経済的ではない。

キャップや把手などに使用されているPEやPPなどの樹脂は、比重が水より小さい性質を利用して、粉碎された状態でPETとの混合物を水に浸漬することにより、比重の水より大きいPETと分離する方式が一般的に行なわれている。

アルミキャップの粉砕片は水による比重分離ではPETと分離出来ない。PETの比重よりも比重の大きい分離液を調製し、アルミ片を沈殿除去する方式を提案しているメーカーもあるが、一般的には磁力選別によりアルミを弾く方法と、静電分離によりPETと分ける方法の組合せが多く用いられている。更にこれでも取りきれないものについて金属検知方式や色識別カメラ(CCDカメラ)方式で補完することが行なわれる場合もある。

ラベル類の除去はボトルの状態で機械的に剥ぎとる方式もあるが充分ではなく、粉碎した破片を衝撃摩擦方式で擦り取るのが最も効果的である。一般には洗浄後ラベルをPETから分離し、脱水乾燥後、風力選別してPETと分離する方式が採られている。水中での比重分離は効率は良くない。ラベルの中にタックラベルと称して合成樹脂製の接着剤(ホットメルト)を全面に塗布してボトルに接着するラベルがあるが、このものは洗浄液の浸透が良くなく、洗浄時のラベル剥離が悪い。更にラベルは剥がれても接着剤はPET側に残る場合がある。この場合にも衝撃摩擦による擦り取りが有効である。このタックラベルについては業界のガイドラインで使用を避ける方向が打ち出されているが、どうしても使用しなければならない場合には剥がれやすい接着剤を用いることになっている。

着色PETボトルの摘出は機械的に行なう場合は色識別カメラ方式が一般的であるが、現在の設備は未だ改善の余地があり、最終的には人手による目視摘出を組合せて補完する必要がある。

内容物の残滓や、付随してくる塵埃、土砂などの汚れは2~5%の苛性ソーダの熱水溶液中で洗浄することによって殆ど溶解してPETから脱離する。この際、界面活性剤の使用は洗浄効果を高める作用がある。内容物の残滓は水性食品が多く、それらに含まれている糖分、蛋白質、脂肪分などは苛性ソーダなどのアルカリの作用で水に溶け易くなる。又、PET樹脂自身

も熱アルカリ溶液中で表面が膨潤したり、一部溶解することもあり、この面からもPETボトルの洗浄にはアルカリを使用することは効果がある。

ボトルに付随して入ってくる塵埃や土砂については大きなものは大部分、洗浄工程でPETから脱落するが、PETに擦り込まれたものは洗浄中の揉み洗いが不十分な場合に、又、水中に懸濁している細かい塵埃の場合は処理液とともに最終製品に入ってくることがあるので洗浄条件の選択や最終工程の水洗については充分注意する必要がある。PETに擦り込まれたものは衝撃摩擦処理により除去することが出来る。

第10表で示したそれぞれの異物に対する分離除去方法を組合せてシステム化したものが現在世界の各所で行なわれているPETボトルの マテリアル リサイクル方式である。

メカニカルクリーニングによって食品直接接触用に使用する場合は、上記のマテリアルリサイクルに加え、回収PETボトルに混入している可能性のある人体に有害な化学物質の除去操作が必要である。これらの物質の性質として米国のFDAは次の5種のいずれかに属するとし、この性質を持つ代理物質を使用してメカニカルクリーニング処理の効果を判定する方法をガイドラインとして示している。²⁹⁾

性質	代理不純化合物
揮発性、非極性	トルエン
揮発性、極性	クロロホルム
不揮発性、非極性	リンダン
不揮発性、極性	ダイアジン
毒性塩	ステアリン酸亜鉛

これらの化学物質をPET樹脂から除去するために採用されている方式は、PET樹脂を高温で加熱溶融して化学物質を熱分解し、更にその状態で減圧処理することによって揮発性の物質や分解物を除去する方式である。同時に固形異物については細かいフィルターを通して濾別し、生成したPET樹脂を引き続いてペレット状のまま加熱処理すること（場合によっては減圧と組合せることもある）によって不純物の除去効果を高める処理が行なわれる。方式によっては少量の化学薬品をPET樹脂に添加して有害物質の分解を促進する方法も考えられる。

2-4)現在のシステムの工程能力

現在WPR、YPRが採用しているPETボトル再生処理システムにおいて工程に持ち込まれたPET樹脂以外の物質がどの程度除去されているかを第9表とPET再生品の品質規格との対比で示したのが第11表である。(第11表 参照)

再生PETの品質規格はPETボトル(非食品用)、繊維、シートなどの再利用の際の適性とWPRの当初の工程能力を勘案して設定されているが、第二種PETボトルの回収に伴って再生処理工程に持ち込まれる異物の種類ごとに、第9表で推定した発生量に対して、再生品の品質規格を比較してみると、当初のシステムはPE、PPなどのポリオレフィン類やPVCボトルの分離除去に対しては効率よく設計されているが、アルミ、ラベル、着色ボトルの排除に関しては未だ充分ではなく、接着剤や直接印刷の洗浄除去に関しては効果がないことがわかる。業界としてはこれらの結果に基づいて、製品を作る段階から、洗浄工程で脱落しないよ

第10表 PETボトルに付随するPET以外の物質の分離除去技術

混入形態	材料・形態	分離・除去方法 (識別方式)	現 状
1. 異種 プラスチック ボトル	PVCボトル	1. 熱水処理 — 手選別 (PVCボトル 白濁) 2. 紫外線照射下で手選別 (PVCボトル 発光) 3. X線吸収差検出 — 機械分離 (PVCボトル 吸収大) 4. X線蛍光検出 — 機械分離 (PVCボトル 蛍光) 5. 泡浮遊 — 機械分離 (PVCボトル 浮遊) 6. 冷凍粉碎 — 篩分 (PVCボトル 微粉化) 7. 近赤外線吸収差検出 — 機械分離 (PVCボトル 吸収)	実用化 実用化 実用化 実用化 中 断 実用化 実用化
	PE, PPボトル	1. 粉碎 — 比重分離 (PE, PP 浮遊)	実用化
2. キャップ	アルミキャップ	1. 手選別 (アルミつきボトル 摘出) 2. 粗粉碎 — 磁選 (渦電流) (アルミ 排出) 3. 粉碎 — 磁選 (静電分離) (PET/アルミ 帯電差) 4. 金属検知 — 機械分離 (アルミ、金属 排出) 5. 粉碎 — 比重分離 (高密度液) (PET 浮遊) 6. 粉碎 — 洗浄 — 機械選別 (CCD) (アルミ 摘出)	実用化 実用化 実用化 実用化 実用化 実用化
	PE, PPキャップ	1. 粉碎 — 比重分離 (PE, PP 浮遊)	実用化
3. キャップライフ	LDPE	1. 粉碎 — 比重分離 (LDPE 浮遊)	実用化
4. ハースカップ	PEハースカップ	1. 熱水処理 — 篩分 (形状差) (ボトルから 分離) 2. 粉碎 — 比重分離 (PE 浮遊)	実用化 実用化
5. ラベル	OPS	1. 機械剥離 — 篩分 — 手選別 (ボトルから 分離) 2. 機械剥離 — 手選別 (ボトルから 分離) 3. 熱水処理 — 機械分離 (ボトルから 分離) 4. 粉碎 — 洗浄 — 乾燥 — 風選 (セリング 効果)	実用化 実用化 実用化 実用化
	紙ラベル	1. 熱水処理 — 機械剥離 (水性糊 使用) 2. 粉碎 — 洗浄 — 乾燥 — 風選 (セリング 効果) 3. 粉碎 — 衝撃摩擦処理 (ボトルから 擦取る)	実用化 実用化 実用化
6. 把手	PP	1. 粉碎 — 比重分離 (ボトルから 分離)	実用化
7. ラベル用 接着剤	エチル/酢ビ系	1. 粉碎 — アルカリ熱洗浄 (一部 溶解) 2. 粉碎 — 衝撃摩擦処理 (ボトルから 擦取る)	実用化 実用化
8. 着色PET ボトル		1. 洗浄 — 手選別 (着色ボトル 摘出) 2. 洗浄 — 機械選別 (CCD) * (反射光の 解析) 3. 粉碎 — 洗浄 — 機械選別 (CCD) (反射光の 解析)	実用化 実用化 実用化
9. 内容物残 滓	水性食品 蛋白質 脂肪分	1. 熱アルカリ/界面活性剤 洗浄 (PETから剥離溶解) 2. 粉碎 — 熱アルカリ/界面活性剤洗浄 (PETから剥離溶解) 3. 粉碎 — 衝撃摩擦処理 (ボトルから 擦取る)	実用化 実用化 実用化
10. 塵埃、 土砂		1. 熱アルカリ/界面活性剤洗浄 (ボトルから 分離) — 比重分離 (メトシヤン)	実用化
		2. 粉碎 — 衝撃摩擦処理 (ボトルから 擦取る)	実用化

* CCD ; 色識別カメラ。物体に光を当て、反射光を解析して識別する。

第11表 再生処理工程における異物除去能力の対比

単位 ppm

	アルミ	PE, PP	紙パル	PVC	着色 PET	黄変ったフルク (接着剤)	インキ付き フルク
回収 PET ボトル *1	800	107,000	6,000	3,000	150,000	?	600
再生PET フルク 品質規格	30	30	320	40	450	1,600	150
実績							
WPR *2	0~210 (6. ⁹)	0~30 (0. ²)	0 (0)	0~900 (55. ⁶)	0~335 (15. ⁸)	0~350 (10. ⁶)	0~280 (12. ⁸)
YPR *3	0~28 (4. ⁶)	0~980 (78. ⁵)	0~209 (30. ⁵)	0~128 (13. ⁶)	0~880 (223. ¹)	0~1220 (407. ⁶)	0~220 (24. ⁸)
*1 ; 第二種 PETボトル回収時に 持ち込まれる 異物の 推定量 *2 ; '98/4~6 月度の 444 ロットの 実測値、()は 平均値 *3 ; '97/12 ~'98/2 月度 968 ロットの 実測値(3 シグマ)、()は 平均値							

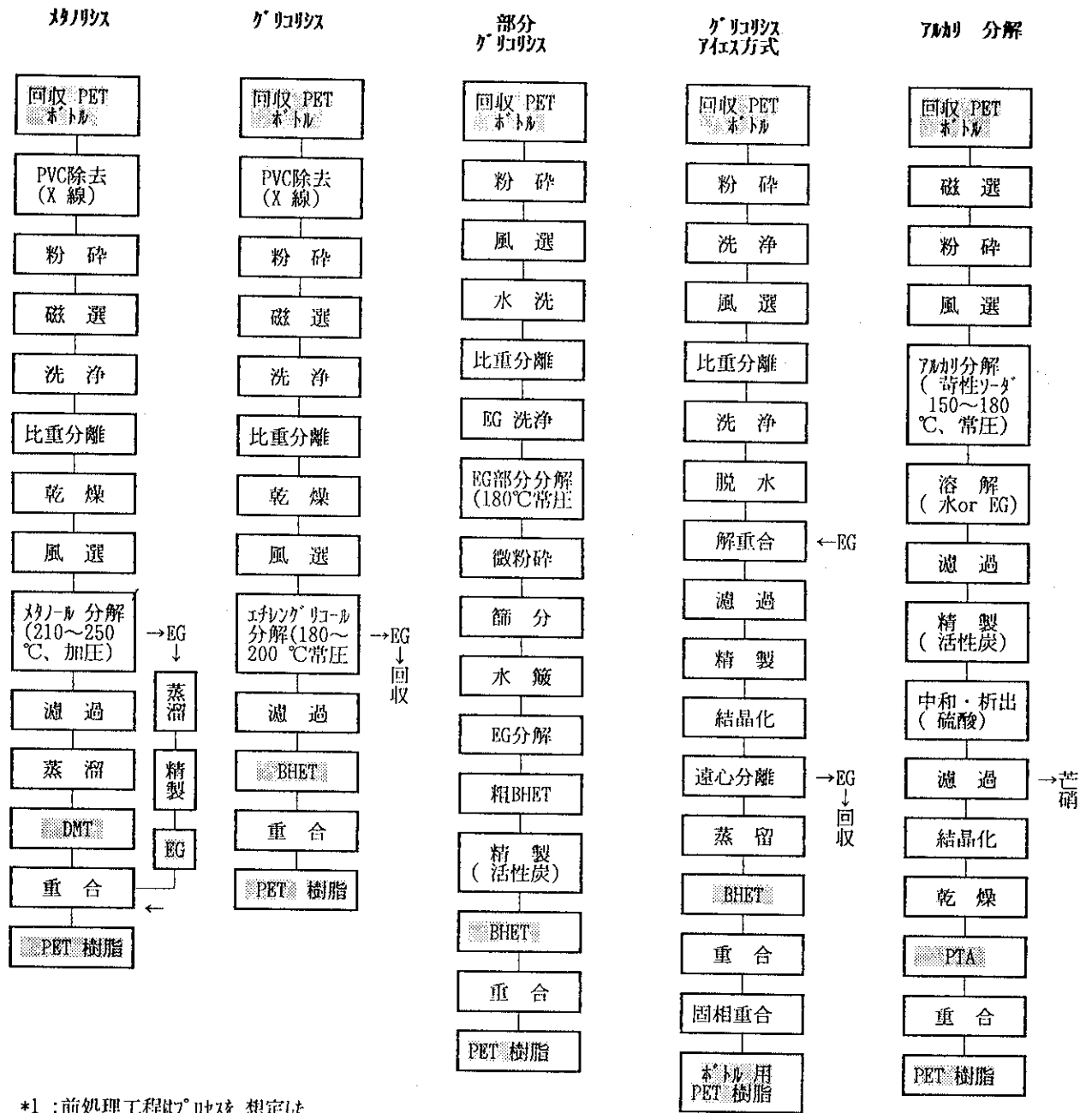
うな接着剤やインキの使用を極力少なくするよう「PETボトルの設計ガイドライン」を制定して、再生PETの品質の向上への協力を関係者をお願いをしているところである。

第11表に当時のWPR、YPRの品質の実績の一例を示した。最近の状況は工程や設備の改良によって、これに比べて良くなっているといわれているが、当時の状況では検出除去装置に問題のあったWPRのPVCを別にして、平均値的には品質規格に入っているものの、バラツキの状況から判断して規格はずれのロットの発生を完全に抑える事は難しい状況である。又、両工場の品質の差をみると Fig.5 のシステムの相違との関連が推察され、今後の改良の手掛かりが得られる可能性もあり興味深い。

2-5) ケミカルリサイクルによるPET以外の物質の分離除去技術

PETを組成原料に分解して精製するケミカルリサイクル方式は、メタノリシスの場合のように、目的とする再生物質を蒸溜で精製する方法を採用する限りにおいて、理論的には回収に伴って混入してくる夾雑物は、どのようなものでも殆ど分離除去できる筈であるが、このよう

Fig. 6 PETケミカルリサイクル工程比較 *



*1 ; 前処理工程の吨数を想定は

現状 ;

実用化
ボトルの実績あり

実用化
ボトルの実績あり

(開発中)

(開発中)

(開発中)

開発会社 ;

DuPont
Hoechst
Eastman

DuPont
Shell

South Corp

アイエス

Tredici
京工織大
URRC

特徴 ;

投資 大
コスト 中~大
品質 優

投資 大?
コスト 中?
品質 良?

投資 中?
コスト 中?
品質 良?

投資 中?
コスト 中
品質 優

投資 中?
コスト 中?
品質 可?

第12表 加工場内による回収PETボトルに付随するPET以外の物質の分離除去技術

混入形態	材料・形態	分離・除去方法	特記事項
1. 異種 プラスチック ボトル キャップ ラベル 把手	PVC ボトル	メタリクス ^{*1} 前処理工程で除去 グリコリクス ^{*2} 濾過分離 アイエス ^{*2} " " 部分グリコリクス 篩分 アルカリ分解 ^{*3} 濾過分離	PVCは分解、設備腐食トラブル PVCはEGK不溶、BHETは可溶 " " " PVCは不変、PETは微粉化 PVCは水に不溶、TA-Naは可溶
	PE, PP ボトル キャップ、ラベ ル、把手	メタリクス 前処理工程で除去 グリコリクス 濾過、比重分離 アイエス " " 部分グリコリクス 比重分離 アルカリ分解 濾過分離	PE, PPは工程を阻害 PE, PPはEGK不溶、BHETは可溶 PE, PPは水に浮揚、PETは沈積 PE, PPは水に不溶、TA-Naは可溶
2. 金属	アルミキャップ	メタリクス 前処理工程で除去 グリコリクス 濾過分離 アイエス " " 部分グリコリクス 篩分、水簸 アルカリ分解 前処理工程で除去	アルミは反応阻害 アルミは水に不溶、BHETは可溶 アルミは水に不変、PETは微粉化 アルミ微粉は水簸で比重分離 アルミ分解→不純物化
3. 紙	紙ラベル	いずれの方式も 前処理工程で除去	つまりなどの工程トラブル
4. ラベル用 接着剤	エチレン/酢ビ 系	メタリクス 蒸溜分離 グリコリクス 活性炭による吸着 アイエス " " 部分グリコリクス 活性炭による吸着 アルカリ分解 活性炭による吸着	DMT 蒸溜で分離 ^{*3} BHET との分離困難 BHET との分離困難 TA-Naとの分離困難
5. 着色PET ボトル		メタリクス 蒸溜分離 グリコリクス 前処理工程で除去 アイエス 蒸溜分離 部分グリコリクス 前処理工程で除去 アルカリ分解 前処理工程で除去	DMT 蒸溜のさい、着色顔料は残留 着色顔料の分離不可能 着色顔料の分離可能 着色顔料の分離不可能 着色顔料の分離不可能
6. 内容物残 滓	炭水化物 蛋白質 脂肪分	いずれの方式も 前処理工程で除去	残留不純物の除去困難
7. 塵埃、 土砂		いずれの方式も 前処理工程で除去	機械損傷などの工程トラブル

*1 ; PET はメタリクス方式ではメタノールと化学反応してDMTに分解される。
 *2 ; PET はグリコリクス、アイエス方式ではエチレングリコール(EG)と化学反応してBHETに分解される
 *3 ; PET はアルカリ分解方式では苛性ソーダと化学反応してTA-Naに分解される